

基于无参考数据的平面阵列故障诊断与健康场预测

祁帅祥¹ 钱旭^{1*} 陈茜²

1 广东理工学院 2 罗田三里畈农业农村服务中心

DOI:10.32629/acair.v3i4.17898

[摘要] 天线阵列在通信、雷达等领域应用广泛,其运行状态影响系统整体性能,因此开展高精度故障诊断具有重要意义。现有大多数故障诊断方法依赖健康阵列的参考方向图,但在实际应用中往往难以获取,限制了工程适用性。针对这一问题,本文提出一种适用于平面天线阵列的无参考故障诊断方法。该方法引入互耦效应建模,结合固定探头压缩测量,并采用低秩-稀疏矩阵补全框架,实现故障阵元重构与健康阵列场预测。与现有方法相比,本方法在不同故障数量和多种信噪比条件下均表现出更高的诊断精度与稳定性。

[关键词] 压缩感知; 故障诊断; 互耦; 相控阵

中图分类号: U226.8+1 文献标识码: A

Fault Diagnosis and Health Field Prediction for Planar Arrays Based on Reference-Free Data

Shuaixiang Qi¹ Xu Qian^{1*} Qian Chen²

1 Guangdong Technology College

2 Luotian Sanlifan Agricultural and Rural Service Center

[Abstract] Antenna arrays are widely used in fields such as communication and radar, and their operational status significantly impacts the overall system performance. Therefore, conducting high-precision fault diagnosis is of great importance. Most existing fault diagnosis methods rely on the reference pattern of a healthy array, but this is often difficult to obtain in practical applications, limiting their engineering applicability. To address this issue, this paper proposes a reference-free fault diagnosis method suitable for planar antenna arrays. The method incorporates mutual coupling effect modeling, combines fixed probe compressed sensing, and employs a low-rank-sparse matrix completion framework to achieve fault element reconstruction and healthy array field prediction. Compared to existing methods, this approach demonstrates higher diagnostic accuracy and stability under varying fault quantities and multiple signal-to-noise ratio conditions.

[Key words] Compressed sensing; fault diagnosis; mutual coupling; phased array

引言

高性能相控阵天线在通信系统中应用广泛,其正常运行是保障系统性能的前提。当阵列元件损坏时,辐射方向图主瓣可能发生偏移,整体性能显著下降,严重威胁系统稳定性^{[1]-[3]}。因此,快速准确地定位故障元件对维持系统性能至关重要。相控阵故障诊断的基本思路是将问题转化为逆问题求解,并通过测量数据实现故障识别^{[4]-[6]}。

近年来,研究者提出了区别于依赖参考场的传统方法的新思路,即利用单个固定探针并改变激励方式进行测量,而非依赖空间多点测量^{[7]-[8]}。该方法通过优化激励信号降低传感矩阵互相关性,从而减少所需测量次数。何劲进一步探讨了互耦在固定探针故障诊断中的作用,并提出结合互耦模型与平均嵌入方向图的建模方法,提高了诊断精度与稳定性。

然而,上述研究普遍仍部分依赖无故障阵列的参考场信息,这一假设在工程实践中难以满足。张帅^[9]虽然部分减少了参考依赖,但仍需已知入射波到达角等先验条件,而这些信息在实际中并非总能获得。在毫米波大规模天线系统和智能反射面等应用中,已有学者提出基于低秩-稀疏分解的无参考方法,但大多忽略了互耦效应的影响。

基于此,本文提出一种无参考互耦感知故障诊断方法,其核心在于融合互耦效应建模、固定探针压缩测量与低秩-稀疏矩阵补全框架:通过充分考虑阵列单元间的电磁耦合特性,在有限测量条件下获取故障阵列信息,实现了故障单元的重构与健康阵列辐射场的预测。该方法仅依赖少量探针测量数据,即可同步完成故障诊断与健康阵列场预测;与传统互耦模型相比,其预测模型在互耦信息融合方面更为充分,从而显著提升了预测精度与鲁棒性。

1 无参考故障诊断建模

本文以一个 $N \times P \times Q$ 个阵元组成的平面天线阵列为研究对象,各阵元均匀排布,并沿 x - y 平面取向,如图1所示。

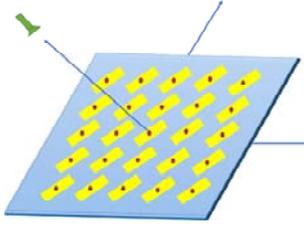


图1 用于故障诊断的偶极子阵列设置

阵列中某一阵元的嵌入方向图是指该阵元被激励、其余所有阵元接匹配负载时所辐射的方向图。通过对阵元嵌入场进行线性叠加,可精确得到阵列远场方向图。因此,考虑互耦效应时,远场点 (θ_0, ϕ_0) 处的全波方向图(f_E)可表示为:

$$f_E(\theta_0, \phi_0) = \sum_{n=1}^N x_n E_n^b(\theta_0, \phi_0) \quad (1)$$

式中, x_n 为第 n 个嵌入阵元的激励, E_n^b 为第 n 个嵌入阵元的方向图。对于 $P \times Q$ 的平面天线阵列,式(1)可以写为:

$$f_E(\theta_0, \phi_0) = \sum_{pq} [X \cdot A_E]_{pq} \quad (2)$$

其中,矩阵 A_E , $X \in C^{P \times Q}$,且 $[A_E]_{(p,q)} = E_{pq}^b(\theta_0, \phi_0)$ 为第 pq 个阵元的嵌入场,其中, $p \in [1, P]$, $q \in [1, Q]$ 。 $[X]_{(p,q)} = x_{pq}$ 表示激励。获取阵列中每个阵元的嵌入方向图时所需的测量次数与阵元总数成正比,因此,在实际应用中,计算远场点 (θ_0, ϕ_0) 处远场(f_0)时,通常采用常规的方向图相乘法,即:

$$f_\alpha(\theta_0, \phi_0) = E_\alpha(\theta_0, \phi_0) \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q x_{pq} e^{jkd_{pq}} \quad (3)$$

其中 $d_{pq} = (p-1)d_x \sin\theta_0 \cos\phi_0 + (q-1)d_y \sin\theta_0 \sin\phi_0$, $E_\alpha(\theta_0, \phi_0)$

可以使用孤立阵元方向图 $E_i(\theta_0, \phi_0)$,也可以使用平均嵌入阵元方向图 $E_v(\theta_0, \phi_0)$, k 为波数。

孤立阵元方向图在建模过程中完全忽略了互耦效应。已有研究表明,若采用平均嵌入阵元方向图替代孤立阵元方向图,则可在方向图相乘与故障诊断中有效体现互耦效应^[11]。其中,平均阵元方向图 $E_v(\theta_0, \phi_0)$ 是指激励中心阵元、其余阵元接匹配负载条件下测得的方向图。基于 $E_i(\theta_0, \phi_0)$ 或 $E_v(\theta_0, \phi_0)$ 经方向图相乘所得的远场 $f_\alpha(\theta_0, \phi_0)$, 分别记为 $f_i(\theta_0, \phi_0)$ 或 $f_v(\theta_0, \phi_0)$ 。

则式(3)可以改写为:

$$f_\alpha(\theta_0, \phi_0) = \sum_{pq} [X \cdot A_\alpha]_{pq} \quad (4)$$

其中,矩阵 $A_\alpha \in C^{P \times Q}$ 为:

$$A_\alpha = E_\alpha(\theta_0, \phi_0) \begin{bmatrix} \exp(jkd_{11}) & \cdots & \exp(jkd_{1Q}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(jkd_{P1}) & \cdots & \exp(jkd_{PQ}) \end{bmatrix}$$

在均匀间距条件下,矩阵 A_0 可写为两个向量的外积,因而其秩为1。由于 E_i 与 E_v 构造的矩阵 A_0 分别记为 A_i 或 A_v 。其中, A_v 已包含互耦效应,更接近精确嵌入场矩阵 A_E 。因此,可以认为实际 A_E 的值非常接近1。

当阵列存在故障时,引入故障指示矩阵 S 以修正场分布。相应的,式(1)中的场表达式可修正为:

$$f_E^d(\theta_0, \phi_0) = \sum_{pq} [X \cdot A_E \cdot S]_{pq} \quad (5)$$

矩阵 $S \in C^{P \times Q}$ 中的非单位值元素对应故障元素。引入矩阵 $D_E \in C^{P \times Q}$, 该矩阵中包含由故障元导致的、相对于矩阵 A_E 的场分量偏差,此时,故障阵列的实测场可以重写为:

$$f_E^d(\theta_0, \phi_0) = \sum_{pq} [X \cdot (D_E + A_E)]_{pq} \quad (6)$$

式中 $D_E = A_E \cdot (S - 1_{P \times Q})$ 。

在所提无参考诊断方法中,假设已知参数仅包括故障阵列的实测场 f_E^d 与激励矩阵 X 。从测量数据重建的未知矩阵可表示为低秩矩阵(A)与稀疏矩阵(D)之和。其中, D 表征故障状态, A 则对应所有阵元的嵌入场。由此构建的优化问题如下:

$$S \cdot A = (D + A) \quad (7)$$

如前所述,在无多径传播的场景下,重建矩阵 A 可近似为包含互耦效应的秩1矩阵。因此,恢复得到的低秩矩阵 A 对应于所有阵元(包括故障阵元)的近似嵌入场,而恢复矩阵 D 则表征故障阵元导致的阵列远场偏差。该推导的核心发现是:通过重建低秩矩阵 A ,可以从故障阵列的测量数据中反演出所有阵元的无故障场分布。矩阵 $A+D$ 对应故障阵列的实际场分布,如图2所示。

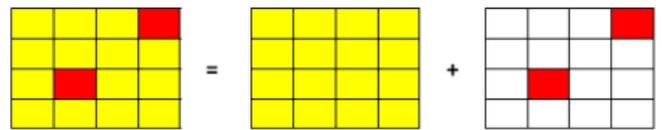


图2 用低秩矩阵+稀疏矩阵($A+D$)表示故障阵列中阵元的场

我们在单个远场点 (θ_0, ϕ_0) 使用 M 种不同的激励矩阵(记为 $\{X_i\}$)进行 M ($\leq N$)次测量(测量值 $y_E^d \in C^{M \times 1}$),以恢复矩阵 A 和 D 。第 i 次测量满足 $f_{E_i}^d(\theta_0, \phi_0) = \sum_{pq} [X_i \cdot A \cdot S]_{pq}$, 由此可得:

$$y_E^d = [f_{E_1}^d, \dots, f_{E_M}^d]^T = \Gamma(D + A) \quad (8)$$

其中 Γ 是未知矩阵 $D+A$ 的线性泛函。

因此, 从 y_E^d 中重构矩阵 D 和 A , 可以实现无需参考阵列信息、无需阵元方向图及互耦模型的无参考故障诊断。通过测量样本 y_E^d 求解矩阵 D 和 A 的凸优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} \min_{A \in C^{P \times Q}, \hat{d} \in C^{N \times 1}} & \eta \|A\|_* + (1-\eta) \|\hat{d}\| \\ \text{s.t} & \left\| y_E^d - \hat{X}(\hat{a} + \hat{d}) \right\| \leq \delta \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\|A\|_*$ 为 A 的核范数, η 是超参数, δ 是与测量噪声方差相关的容限。向量 \hat{d} 和 \hat{a} 分别表示 $\text{vec}(D)$ 和 $\text{vec}(A)$ 。向量 $\hat{d}, \hat{a} \in C^{N \times 1}$, 矩阵 \hat{X} 的行包含对应测量(第 m 次)的向量化激励矩阵 $\text{vec}(X_m)^T \in C^{1 \times N}$ 。超参数搜索范围限定为 $\eta \in [0, 1]$ 。我们选取优化后的激励矩阵 (\hat{X}), 它可以减少故障诊断所需的测量次数^[10]。

通过最小化核范数, 使重建矩阵 A 呈现低秩特性, 进而逼近精确嵌入场 A_e 。这一过程不仅能恢复包含互耦效应的阵元嵌入场, 还能实现无参考条件下的故障诊断与健康场预测。

值得注意的是, 传统故障检测压缩感知方法在计算方向图时, 采用 A_i 或 A_v , 并求解 l_1 最小化问题; 而在我们的无参考分析中, 这些矩阵是未知的。我们预期重建矩阵 A 相较于 A_i 或 A_v , 更接近精确矩阵 A_e , 数值结果也验证了这一点。一旦获取阵列中所有阵元的嵌入场, 对于任意激励, 均可通过式 (1) 预测测量点处健康阵列的期望场。预测的健康阵列场与全波仿真结果高度吻合, 因此比现有方向图相乘方法更精确。

2 仿真设置

考虑工作频率为 3.5GHz 的 15×15 偶极子阵列 ($N=225$), 偶极子沿 x - y 平面旋转 45° , 长度为 0.47λ , 阵元间距为 0.45λ 。

在远场固定点 ($\theta_0 = 0, \phi_0 = 0$) 处, 利用 MATLAB 天线工具箱计算随激励变化的全波复电场 E_v 。激励相位与幅度分别在区间 $[0-2\pi]$ 、 $[0-1]$ 内量化为 6 比特^{[10], [11]}。针对固定数量的故障, 进行 M 次测量, 并利用 MATLAB-CVX 工具箱求解式 (9), 以重建故障指示矩阵 S 。超参数 η 通过区间 $[0, 1]$ 网格搜索确定; 所有仿真中取 $\eta = 0.2$, 且 $\delta = 10^{-SNR/20} \|y_E^d\| / \sqrt{M}$ 。

假设阵元仅有“正常”与“故障”两种状态, 当 $|S_{pq}^{rec}| < 0.5$

时记为 0, 否则记为 1。采用 100 次蒙特卡洛 (MC) 仿真, 随机改变故障位置 (数量固定), 以完全恢复故障数与位置为判断准则, 统计成功恢复率 (RSR)。仿真结果分析包含基于 D 的故障诊断和基于 A 的健康阵列远场预测。

3 低秩矩阵重构与健康场预测

在故障数为 10、信噪比 (SNR) 为 25dB 的测试中, 恢复低秩+稀疏矩阵 ($A+D$) 需 134 次测量。此时不仅获得了全部阵元的嵌入场 (矩阵 A), 也准确识别出故障阵元。与精确嵌入场矩阵 A_e 对比, 所提模型 (A)、平均嵌入模型 (A_v)、孤立模型 (A_i) 的相对误差分别为 4.27%、14.68%、60.94%。结果显示, 所提模型在压缩测量条件下显著优于传统模型。

进一步地, 利用恢复的嵌入场在 ($\theta_0 = 0, \phi_0 = 0$) 处预测健康阵列电场分量 E_v 。其结果与全波仿真在幅度与相位上高度一致, 见表 1。由此可见, 该方法无需参考数据, 即可在有限测量条件下实现故障诊断与健康预测。

为验证方法的普适性, 我们将分析拓展至 7×7 贴片阵列, 设置工作频率 3.5GHz、SNR=25dB, 阵元间距 0.7λ 。在故障数为 3 和 4 时, 分别需 39 次和 44 次测量实现 RSR=100。当固定故障数为 3 且测量次数 $M=40$ 时, 所提模型、平均嵌入模型和孤立模型的相对误差分别为 6.87%、7.20%、30.45%。结果进一步验证了该方法的有效性和通用性。

表 1 单位激励下测量位置处对健康阵列预测复场的对比

模型	健康阵列	
	幅度 (Amp)	相位 (Ph)
全波 ($f_E(\theta_0, \phi_0)$)	0.0471	-73.25
预测 ($f(\theta_0, \phi_0)$)	0.0453	-73.20
平均嵌入 ($f_v(\theta_0, \phi_0)$)	0.0456	-67.08
孤立 ($f_i(\theta_0, \phi_0)$)	0.0601	-100.74

4 结论

本文提出了一种无参考的阵列故障诊断方法。该方法仅需在固定观测点采集少量测量样本, 即可准确识别阵列中故障阵元的数量与位置。在不同故障数和不同信噪比 (SNR) 的条件下, 均实现 100% 的诊断准确率, 且无需依赖真实标签数据。结果表明, 重建的低秩矩阵在精度上显著优于传统的孤立与平均嵌入模型, 因此能够基于故障阵列的测量样本更准确的预测健康阵列的场分布。该方法对于故障阵列的补偿具有潜在的应用价值, 并为后

续研究提供了新的思路。需要指出的是,本文分析基于直射路径测量,多径环境下的故障诊断仍有待进一步研究。

[参考文献]

[1]黄晟,焦禹,罗琼.一种用于平面相控阵的幅相校准方法[J].雷达与对抗,2025,45(03):43-47.

[2]韦哲,刘昌锦,戴宪策.统计模式识别在相控阵天线故障诊断中的应用研究[J].信号处理,2014,30(08):987-992.

[3]Zhang Y, Wang W. Robust array diagnosis against array mismatch using amplitude-only far field data[J].IEEE Access, 2019,7:5589-5596.

[4]许大进,李琳,宣浩.一种机载相控阵雷达波控系统设
计[J].雷达科学与技术,2015,13(06):572-576.

[5]汪江秀,王友仁.相控阵天线故障诊断方法研究[J].电子测量技术,2016,39(08):163-167.

[6]李玮,邓维波.相控阵天线辐射单元故障诊断新方法[J].现代雷达,2014,36(11):29-34.

[7]韦哲,李从利,沈延安,等.基于两阶段模型的无人机图像

厚云区域内容生成[J].计算机学报,2021,44(11):2233-2247.

[8]何劲,唐莽,舒汀,等.阵元位置互质的线性阵列:互耦分析和角度估计[J].电子与信息学报,2022,44(08):2852-2858.

[9]张帅,龚书喜,路宝,等.利用PSO同时优化阵列天线的辐射和散射特性[J].西安电子科技大学学报,2010,37(04):726-730.

[10]李双志,雷豪杰,郭新.非理想RIS辅助MIMO系统稀疏信道估计与阵列阻塞诊断[J].电子与信息学报,2025,47(08):2573-2583.

[11]李晓灿,谢鲲,张大方,等.基于低秩分解的网络异常检测综述[J].计算机研究与发展,2022,59(07):1589-1609.

作者简介:

祁帅祥(1998--),男,汉族,安徽阜阳人,助教,硕士研究生,广东理工学院,研究方向:材料力学行为研究、机械设计。

*通讯作者:

钱旭(1995--),男,汉族,湖北武汉人,助教,硕士研究生,广东理工学院,研究方向:电力系统及其自动化、故障检测等研究。